

37P3809



32

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 42 38 833 A 1**

⑤1 Int. Cl. 5:  
**G 05 B 13/02**  
B 24 B 49/10  
B 23 Q 15/00  
B 23 F 23/00

⑳ Aktenzeichen: P 42 38 833.3  
㉑ Anmeldetag: 17. 11. 92  
㉒ Offenlegungstag: 29. 7. 93

JC625 U.S. PTO  
09/557874  
04/24/00

DE 42 38 833 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1  
22.01.92 DE 42 01 645.2 30.04.92 DE 42 14 393.4

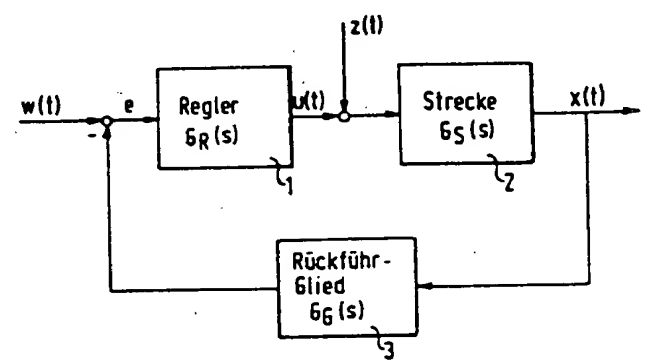
⑦1 Anmelder:  
Hurth Maschinen und Werkzeuge GmbH, 8000  
München, DE

⑦4 Vertreter:  
Mitscherlich, H., Dipl.-Ing.; Körber, W., Dipl.-Ing.  
Dr.rer.nat.; Schmidt-Evers, J., Dipl.-Ing.; Melzer, W.,  
Dipl.-Ing., Pat.-Anwälte, 8000 München

⑦2 Erfinder:  
Höcht, Johannes, Prof. Dr. Ing.; 8052 Moosburg, DE;  
Leicht, Bernhard, 8000 München, DE

⑤4 Regelungs-Anordnung

⑤7 Um bei einer Regelungs-Anordnung, insbesondere zur Regelung des Antriebs für ein bewegtes Werkstück oder ein bewegtes Werkzeug an einer Werkzeugmaschine eine periodische Führungsgröße ( $w$ ) möglichst ohne Regeldifferenz einzuregeln, soll der Regler (1) mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweisen, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Führungsgröße ( $w$ ) ist. Zusätzlich oder alternativ dazu soll der Regler (1) zum Ausregeln einer periodischen Störgröße ( $z$ ) mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweisen, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ( $z$ ) ist. Zum Ausregeln einer periodischen Störgröße ( $z$ ) kann als zusätzliche oder alternative Maßnahme im Rückführzweig für die Regelgröße ( $x$ ) ein Rückführglied (3) vorgesehen sein, welches mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder Polstelle des Polstellenpaares gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ( $z$ ) ist.



DE 42 38 833 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Regelungs-Anordnung gemäß Oberbegriff des Anspruchs 1.

Regelungs-Anordnungen der hier betrachteten Art werden normalerweise aus zwei Gründen angewendet. Der erste Grund besteht darin, daß der geregelte Antrieb einer sich ändernden Führungsgröße möglichst exakt folgen soll. Es ist bekannt, daß man dieser Forderung bei stationärer Führungsgröße am besten mit einem Integral-Regler nachkommen kann. Dieser hat die Eigenschaft, stationäre, d. h. sprunghafte Änderungen der Führungsgröße ohne bleibende Regelabdifférenz einzuregeln, d. h., er hat Tiefpaßcharakter mit der Grenzfrequenz Null.

Der zweite Grund besteht darin, daß auf der Strecke Störgrößen eingreifen können, die das Regelverhalten der Regelungs-Anordnung störend beeinflussen. Die Regelungs-Anordnung soll so ausgelegt sein, daß sie den Einfluß der Störgrößen möglichst vollständig ausregelt. Auch hier findet wiederum der Integral-Regler die häufigste Anwendung, wenn stationäre, d. h. sprunghafte Störgrößen vollständig ausgeregelt werden sollen.

In industriellen Prozessen sind stationäre Änderungen von Führungs- oder Störgrößen jedoch eher die Ausnahme. Wesentlich häufiger ist der Fall, daß sich Führungs- und Störgrößen kontinuierlich und relativ schnell ändern. Um das Regelverhalten der Regelungs-Anordnung an derartige Änderungen von Führungs- und Störgrößen anzupassen, kann man die Regelverstärkung erhöhen. Dies ist jedoch meistens nur in bestimmten Grenzen möglich. Bei einem Überschreiten der Grenzen kommt es zu Instabilitäten.

Ein besonderer Fall, der hier betrachtet werden soll, sind Führungs- und Störgrößen, die sich periodisch ändern. Gerade spanende Bearbeitungsvorgänge sind nämlich oft periodisch, wie etwa Hobeln, Drehen, Fräsen, Schleifen, Bohren usw. Hierbei sind nicht nur Führungsgrößen periodischer Natur, wie etwa die Änderung der Winkellage eines Drehteiles oder die Änderung der translatorischen Lage eines Fräasers, sondern auch die Störungen, beispielsweise die Spankräfte, treten periodisch auf.

Ein Beispiel für derartige Prozesse ist die Bearbeitung von Schabradern mit einer Schleifscheibe. Zur Erzeugung der Evolvente wird das Schabrad (Werkstück) periodisch linear bezüglich der Schleifscheibe bewegt und muß gleichzeitig eine periodische hin- und hergehende Drehbewegung um seine Achse durchführen. Die Linearbewegung kann dabei die Führungsgröße für die periodische Hin- und Herbewegung des Schabrades um seine Drehachse sein. Die periodische Drehbewegung und Linearbewegung des Schabrades erfährt jedoch wiederum periodische Störungen, wenn die Schleifscheibe mit dem Schabrad kontaktiert. Die Störgröße hat dabei naturgemäß die gleiche Grundfrequenz, wie die Führungsgröße.

Ein weiteres Beispiel für einen derartigen Prozeß stellt die Bearbeitung von Zahnrädern im kontinuierlichen Abwälzverfahren dar. Das zahnrad- oder schneckenförmige Werkzeug folgt der periodisch wiederkehrenden Lage des zahnradförmigen Werkstückes. Aufgrund der Bearbeitung treten periodische Störungen derselben Grundfrequenz auf.

Liegt im erstgenannten Fall eine Kopplung einer periodischen Linearbewegung mit einer periodischen Drehbewegung vor, so sind im zweitgenannten Fall zwei Drehbewegungen miteinander verkoppelt.

In gleicher Weise sind auch Kopplungen periodischer Linearbewegungen denkbar, wie sie beim Kopierfräsen auftreten können.

Zur vollständigen Einregelung von periodischen Führungsgrößen wird heute üblicherweise eine Vorsteuerung des Folgeregelkreises eingesetzt. Zur vollständigen Ausregelung einer periodischen Störung mit a priori bekannter Frequenz schlug 1971 C. Johnson eine Erweiterung des seit 1960 bekannten Luenberger Beobachters durch ein Störmodell vor (siehe Buch von O. Föllinger "Regelungstechnik", Hüthig-Verlag Heidelberg, 6. Aufl. Seite 519 und Literaturhinweise S. 526). Der phasen- und amplitudenrichtig ermittelte Störschätzwert wird nach dieser Methode mit umgekehrtem Vorzeichen der Strecke aufgeschaltet, wie dies auch seit vielen Jahrzehnten mit direkt meßbaren Störungen geschieht ("Störgrößenaufschaltung"). Dieses Verfahren läßt sich vorteilhaft bei der Regelung durch einen digitalen Prozeßrechner einsetzen. Dabei muß für jeden Abtastschritt sowohl das mathematische Abbild der Regelstrecke wie auch der Störung berechnet werden. Dies führt zu einem erheblichen Rechenaufwand, der bei schnellen Vorgängen, wie etwa der Motorregelung, einen heute üblichen Standardmikroprozessor überfordern kann und den Einsatz eines teuren Gleitpunkt-Signalprozessors nötig macht.

Der vorliegenden Erfindung dagegen liegt die Aufgabe zugrunde, eine Regelungs-Anordnung der eingangs beschriebenen Art zu schaffen, mit der es möglich ist, periodische Störgrößen ohne aufwendigen Störgrößen-Beobachter vollständig oder nahezu vollständig auszuregeln und/oder periodische Führungsgrößen vollständig oder nahezu vollständig einzuregeln, wobei die Störgröße und die Führungsgröße auch die gleiche Periodenfrequenz haben können.

Die Lösung dieser Aufgabe besteht gemäß Kennzeichen des Anspruchs 1 darin, daß der Regler zum Einregeln einer periodischen Führungsgröße mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Führungsgröße ist, und/oder daß der Regler zum Ausregeln einer periodischen Störgröße mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ist.

Weiterhin ist es gemäß Anspruch 2 möglich, daß zum Ausregeln einer periodischen Störgröße als zusätzliche oder alternative Maßnahme im Rückführzweig für die Regelgröße ein Rückführglied vorgesehen ist, welches mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ist.

Wenn das periodische Führungssignal oder das periodische Störsignal sinusförmig ist, so genügt es, wenn der entsprechende Regler bzw. das entsprechende Rückführglied nur ein einziges konjugiert komplexes Polstellen-

paar haben, dessen Betrag im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen gleich oder annähernd gleich der entsprechenden Periodenfrequenz ist. In diesem Fall hat der Regler bzw. das Rückführglied Bandpaßcharakter.

Bei einer nicht-sinusförmigen Führungsgröße oder Störgröße sollten gemäß den Ansprüchen 3 und 4 noch weitere konjugiert komplexe Polstellenpaare für den Regler bzw. das Rückführglied vorgesehen werden, wobei der Betrag dieser weiteren Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der entsprechenden Harmonischen der Führungs- bzw. Störgrößen ist. In diesem Fall hat der Regler bzw. das Rückführglied Kammfiltercharakter.

Sowohl für den Fall der periodischen Führungsgröße als auch für den Fall der periodischen Störgröße sollten/sollte der Regler und/oder das Rückführglied vorzugsweise integral wirken. In diesem Fall ist ein vollständiges Einregeln der Führungsgröße und/oder ein vollständiges Ausregeln der Störgröße ohne bleibende Regeldifferenz möglich. Das konjugiert komplexe Polstellenpaar bzw. die konjugiert komplexen Polstellenpaare dürfen dann gemäß Anspruch 5 nur auf der imaginären Achse im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen liegen.

Es ist aber auch möglich, daß der Regler und/oder das Rückführglied auf periodische Signale proportional wirken. In diesem Fall ist eine bleibende Regeldifferenz unvermeidbar, die aber umso geringer ist, je höher die Proportionalverstärkung des Reglers ist. Das konjugiert komplexe Polstellenpaar bzw. die konjugiert komplexen Polstellenpaare muß/müssen dann gemäß Anspruch 6 links der imaginären Achse im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen liegen.

Der integrale oder proportionale Bandpaßregler bzw. das integrale oder proportionale Rückführglied kann durch analoge oder digitale Schaltungen realisiert werden wie sie nach dem Stand der Technik bekannt sind. Es wird in diesem Zusammenhang auf das Buch von U. Tietze und CH. Schenk "Halbleiterschaltungstechnik", Springer-Verlag, 9. Auflage, Seiten 424ff und 827ff hingewiesen. Zur Realisierung von Bandpaßreglern bzw. Rückführgliedern mit Bandpaßverhalten durch analoge Schaltungen sind aktive Filter geeignet. Eine Realisierung mit digitalen Filterschaltungen ist beispielsweise mit FIR-Filtern (Finite-Impulse-Response-Filter) oder durch IIR-Filter (Infinite-Impulse-Response-Filter) möglich.

Realisierungsmöglichkeiten für einen Regler oder ein Rückführglied mit proportionalen oder integralem Charakter und mit Kammfilter-Verhalten ist Gegenstand der Ansprüche 7—12.

Anspruch 13 gibt Anwendungsmöglichkeiten der erfindungsgemäßen Regelungsanordnung an.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnungen beschrieben.

Es zeigen:

Fig. 1 das Blockschaltbild für eine Regelungs-Anordnung,

Fig. 2 eine erste etwas detailliertere Ausführungsform des Reglers aus Fig. 1,

Fig. 3a einen Gleichsignalsprung der Regeldifferenz,

Fig. 3b die Sprungantwort eines üblichen  $PT_1$ -Reglers und eines üblichen I-Reglers auf den Gleichsignal-sprung gemäß Fig. 3a,

Fig. 4a einen Wechselsignalsprung der Regeldifferenz,

Fig. 4b die Antwort eines integralen Bandpaßreglers auf den Wechselsignalsprung gemäß Fig. 4a,

Fig. 5 die Lage eines Polstellenpaares für einen integralen Bandpaßregler im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen,

Fig. 6a wiederum einen Wechselsignalsprung der Regeldifferenz,

Fig. 6b die Sprungantwort eines proportionalen Bandpaßreglers auf den Wechselsignalsprung gemäß Fig. 6a,

Fig. 7 die Lage eines Polstellenpaares für einen proportionalen Bandpaßregler im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen,

Fig. 8 eine praktische Realisierung eines integralen Bandpaßreglers,

Fig. 9 eine praktische Realisierung eines proportionalen Bandpaßreglers,

Fig. 10 eine Schabradschleifmaschine, bei der die erfindungsgemäße Regelungs-Anordnung Anwendung findet.

Fig. 11 eine zweite etwas detailliertere Ausführungsform des Reglers aus Fig. 1,

Fig. 12 das Blockschaltbild für eine praktische Realisierung eines Kammfilter-Reglers,

Fig. 13 eine graphische Darstellung der Abhängigkeit des Betrages des Frequenzganges eines proportionalen Kammfilter-Reglers von der Kreisfrequenz,

Fig. 14 die Lage der Polstellen für einen proportionalen Kammfilter-Regler im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen,

Fig. 15 der Betrag des Frequenzganges eines integralen Kammfilter-Reglers in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz,

Fig. 16 die Lage der Polstellen für einen integralen Kammfilter-Regler im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen,

Fig. 17 der Betrag eines anderen Frequenzganges des integralen Kammfilter-Reglers in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz,

Fig. 18 eine praktische Realisierung des Kammfilter-Reglers nach Fig. 12,

Fig. 19 eine im kontinuierlichen Abwälzverfahren arbeitende Zahnradbearbeitungsmaschine, bei der die erfindungsgemäße Regelungs-Anordnung Anwendung findet.

Die in Fig. 1 gezeigte Regelungs-Anordnung ist ein üblicher Regelkreis mit Regler 1 und Strecke 2, wobei allerdings im Rückkopplungsweig ein Rückführglied 3 eingeschaltet ist. Letzteres ist aber nicht zwingend notwendig. Zunächst sollen die verwendeten Abkürzungen definiert werden. Es bedeuten:

$t$  = Zeit

$s$  = komplexe Veränderliche =  $\sigma + j\omega$  = Realteil der komplexen Veränderlichen

$f$  = technisch-physikalische Frequenz

$\omega = 2\pi f$  = Kreisfrequenz

$w$  = Führungsgröße in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

5  $e$  = Regeldifferenz in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$u$  = Stellgröße in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$z$  = Störgröße in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$x$  = Regelgröße in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

$a$  = Ausgangsgröße des Kammfilter-Reglers in Abhängigkeit von der Zeit  $t$

10  $W$  = Führungsgröße in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$E$  = Regeldifferenz in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$U$  = Stellgröße in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$Z$  = Störgröße in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$X$  = Regelgröße in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

15  $G_R(s)$  = Übertragungsfunktion des Reglers

$G_S(s)$  = Übertragungsfunktion der Strecke

$G_G(s)$  = Übertragungsfunktion des Rückführgliedes

$G_{BP}(s)$  = Übertragungsfunktion des Bandpaßreglers

$G_{KF}(s)$  = Übertragungsfunktion des Kammfilter-Reglers

20  $G_{RR}(s)$  = Übertragungsfunktion des Restreglers

$G_w(s)$  = Übertragungsfunktion zwischen der Führungsgröße  $W$  und der Regelgröße  $X$  bei geschlossenem Regelkreis

$G_z(s)$  = Übertragungsfunktion zwischen der Störgröße  $Z$  und der Regelgröße  $X$  bei geschlossenem Regelkreis

$G_{KF(j\omega)}$  = Frequenzgang des Kammfilters

25  $R$  = wählbarer Widerstand

$C$  = wählbare Kapazität

$U_e$  = der Regeldifferenz entsprechende Eingangsspannung in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$U_u$  = der Stellgröße entsprechende Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$

$U_u$  = der Stellgröße entsprechende Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz

30  $T_i$  = Integrationskonstante des üblichen I-Reglers

$T_v$  = Verzögerungszeit des Totzeitgliedes

$K_1$  = Verstärkungsfaktor

$K_2$  = Verstärkungsfaktor.

35 Bei der nachfolgenden Betrachtung sollen die periodischen Signale der Einfachheit halber als sinusförmig angenommen werden. Da sich bekanntlich nicht-sinusförmige periodische Signale nach Fourier in eine Reihe sinusförmiger Signale zerlegen lassen, gelten die für sinusförmige periodische Signale angestellten Betrachtungen gleichermaßen für nicht-sinusförmige periodische Signale. Die Konsequenzen werden später noch erläutert.

40 Ziel der Erfindung ist es, die in Fig. 1 gezeigte Regelungs-Anordnung für eine sinusförmige Führungsgröße  $w$  und/oder für eine sinusförmige Störgröße  $z$  so auszugestalten, daß die Führungsgröße  $w$  möglichst vollständig eingeregelt wird und/oder die Störgröße  $z$  möglichst vollständig ausgeglichen wird. Das bedeutet also, daß die Regelgröße  $x$  der sinusförmigen Führungsgröße  $w$  möglichst ohne Regelabweichung folgen soll, und das bedeutet ferner, daß die Regelgröße  $x$  auf eine sinusförmige Störgröße  $z$  möglichst nicht reagieren soll.

45 In den folgenden Gleichungen (1) bis (6) wird die Übertragungsfunktion  $G_w(s)$  für die Führungsgröße  $w$  ermittelt.

$$X = G_S \cdot U \text{ für } Z = 0 \quad (1)$$

$$U = G_R \cdot E = G_R \cdot (W - G_G \cdot X) \quad (2)$$

$$50 \quad X = G_S \cdot G_R \cdot (W - G_G \cdot X) \quad (3)$$

$$X + G_S \cdot G_R \cdot G_G \cdot X = G_S \cdot G_R \cdot W \quad (4)$$

$$55 \quad (1 + G_S \cdot G_R \cdot G_G) \cdot X = G_S \cdot G_R \cdot W \quad (5)$$

$$\frac{X}{W} = G_w(s) = \frac{G_S \cdot G_R}{1 + G_S \cdot G_R \cdot G_G} \quad (6)$$

60 Damit die Regelgröße  $x$  der Führungsgröße  $w$  ohne Regelabweichung folgt, geltend unabhängig von der Frequenz folgende allgemeine Grenzwertbetrachtungen:

für  $G_R \rightarrow \infty$  und/oder  $G_S \rightarrow \infty$  ergibt sich  $G_w = 1$ , falls  $G_G = 1$  ist (7)

65 Zunächst sei ein Gleichsignal-Sprung betrachtet, wie er in Fig. 3a gezeigt ist. Auf diesen Signalsprung reagiert ein normaler I-Regler dadurch, daß sein Ausgangssignal — von Null ausgehend — stetig ansteigt, wie dies in Fig. 3b gezeigt ist.

Der normale I-Regler hat die Übertragungsfunktion

$$G_R = \frac{1}{S \cdot T} \quad (8)$$

Das bedeutet, daß der normale I-Regler Tiefpaßverhalten mit der Grenzfrequenz Null hat. Bei der Frequenz Null hat er eine Polstelle. Demnach erfüllt der normale I-Regler bei  $G_G = 1$  die Bedingung für  $G_w = 1$  gemäß Gleichung (7).

Nunmehr soll gemäß den folgenden Gleichungen (9 bis 14) die Übertragungsfunktion für die Störgröße  $z$  berechnet werden:

$$X = G_S \cdot (Z + U) \text{ für } W = 0 \quad (9)$$

$$U = G_R \cdot E = -G_R \cdot G_G \cdot X \quad (10)$$

$$X = G_S \cdot Z - G_S \cdot G_R \cdot G_G \cdot X \quad (11)$$

$$X + G_S \cdot G_R \cdot G_G \cdot X = G_S \cdot Z \quad (12)$$

$$(1 + G_S \cdot G_R \cdot G_G) \cdot X = G_S \cdot Z \quad (13)$$

$$\frac{X}{Z} = G_Z(s) = \frac{G_S}{1 + G_S \cdot G_R \cdot G_G} \quad (14)$$

Damit die Störgröße  $z$  die Regelgröße  $x$  nicht beeinflußt, gilt folgende Grenzwertbetrachtung:

$$\text{für } G_G \rightarrow \infty \text{ und/oder } G_R \rightarrow \infty \text{ ergibt sich } G_S = 0 \quad (15)$$

Diese Bedingung erfüllt der normale I-Regler wiederum für den Gleichsignal-Sprung.

Betrachtet man nun anstelle des Gleichsignal-Sprunges einen Wechselsignalsprung, wie er in Fig. 4a gezeigt ist, so hat das Wechselsignal eine bestimmte Frequenz, die nicht Null ist. Das bedeutet, daß der normale I-Regler mit der Übertragungsfunktion gemäß Gleichung (8) bei dieser Frequenz eine endliche Regelverstärkung hat. Dies wiederum hat zur Folge, daß die Übertragungsfunktion  $G_Z$  für die Störgröße  $z$  gemäß Gleichung (14) aufgrund der Wirkung des normalen I-Reglers nicht mehr Null sein kann. Demnach wird eine sinusförmige Störgröße  $z$  nicht vollständig ausgeglichen.

Es soll nun untersucht werden, wie die Bedingung  $G_w \rightarrow 1$  bei  $G_G = 1$  gemäß der Gleichung (7) für eine sinusförmige Führungsgröße  $w$  erfüllt werden kann. Die Lösung liegt darin, daß der Regler 1 und/oder die Strecke 2 so konzipiert werden, daß sie Bandpaßverhalten haben, wobei das Polstellenpaar bei der Periodenfrequenz der Führungsgröße  $w$  liegen muß. Da die Strecke in der Regel nicht einflußbar ist, muß der Regler in dieser Weise dimensioniert werden.

Zur Erfüllung der Bedingung  $G_Z \rightarrow 0$  gemäß Gleichung (15) liegt die Lösung für eine sinusförmige Störgröße  $z$  darin, daß der Regler 1 und/oder Rückführglied 3 bei der Periodenfrequenz der Störgröße  $z$  eine Polstelle haben, also Bandpaßverhalten zeigen. Zusätzlich oder alternativ kann die Strecke 2 bei dieser Frequenz eine Nullstelle haben. Die Strecke müßte als Bandsperre wirken. Da die Strecke, wie erwähnt, in der Regel nicht oder nur unter Schwierigkeiten einflußbar ist, bleiben die Polstellen bei der Periodenfrequenz der Störgröße  $z$  für den Regler und/oder das Rückführglied als praktisch einfach realisierbare Lösungsmöglichkeiten.

Damit der Regler 1 und/oder das Rückführglied 3 die Bedingung  $G_R \rightarrow \infty$  bzw.  $G_G \rightarrow \infty$  erfüllen, sollen sie bei der Frequenz der Stör- bzw. Führungsgröße eine unendliche Verstärkung, also integralen Charakter oder wenigstens eine sehr hohe endliche Verstärkung, also proportionalen Charakter haben.

Bei nicht-sinusförmigen periodischen Führungs- oder Störsignalen wären für den Regler 1 bzw. das Rückführglied 3 ggf. weitere Polstellen bei den Harmonischen der Grundfrequenz zu setzen.

Fig. 2 zeigt einen Regler 1, der sich aus einem Bandpaßregler 4 und einem Restregler 5 zusammensetzt. Der Bandpaßregler 4 kann ein integraler oder proportionaler Regler der zuvor beschriebenen Art sein. Für den Restregler 5 gibt es keine bestimmten Bedingungen, d. h. er kann z. B. ein PD-Regler oder ein PID-Regler sein. Falls seine Übertragungsfunktion Pole hat, müssen diese nicht bei der Periodenfrequenz der Führungsgröße  $w$  oder der Periodenfrequenz der Störgröße  $z$  liegen. Ggf. kann der Restregler auch ganz entfallen.

Die Übertragungsfunktion des aus dem Bandpaßregler 4 und dem Restregler 5 gemäß Fig. 2 zusammengesetzten Reglers 1 ist:

$$G_R = G_{RR} + G_{BP} \quad (16)$$

Setzt man anstelle von  $G_R$  in die Gleichungen (6) und (14)  $G_{RR} + G_{BP}$ , so werden die Grenzwertüberlegungen gemäß den Gleichungen (7) und (15) dadurch nicht beeinträchtigt, wenn nunmehr statt  $G_R \rightarrow \infty$  gesetzt wird  $G_{BP} \rightarrow \infty$ .

Das bedeutet mit anderen Worten, daß der Restregler für die hier betrachtete Funktion des Bandpaßreglers ohne Einfluß ist.

Das Verhalten eines integralen Bandpaßreglers ist durch die Fig. 4a und 4b demonstriert. Auf einen Wechselsignalsprung der Regelgröße  $e$  gemäß Fig. 4a reagiert der integrale Bandpaßregler mit der Erzeugung einer Stellgröße  $u$ , die ebenfalls ein Wechselsignal mit der gleichen Frequenz und stetig steigender Amplitude ist. Was

die stetig steigende Amplitude betrifft, besteht Übereinstimmung mit dem normalen I-Regler gemäß Fig. 3b. Der integrale Bandpaßregler hat bei der Resonanzfrequenz, d. h. bei seiner Polstelle eine unendliche Verstärkung. Er ist demnach in Analogie zum normalen I-Regler bei stationären Signalsprüngen geeignet, eine periodische Führungsgröße  $w$  vollständig einzuregulieren und eine periodische Störgröße  $z$  vollständig auszuregulieren.

Wie man der Fig. 5 entnehmen kann, liegen die Polstellen des integralen Bandpaßreglers auf der imaginären Achse jw im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen  $s$ . Der Betrag der Polstellen ist gleich ihrem Abstand vom Nullpunkt.

Dieser Betrag muß so gewählt werden, daß er gleich der Periodenfrequenz der Führungs- bzw. Störgröße ist.

Der proportionale Bandpaßregler ist durch die Fig. 6a und 6b gekennzeichnet. Auf den in Fig. 6a gezeigten Wechselsignalsprung der Regelabweichung  $e$  antwortet der proportionale Bandpaßregler mit der Erzeugung einer Stellgröße  $u$ , die wiederum ein Wechselsignal mit der gleichen Frequenz ist und deren Amplitude sich innerhalb einer Einschwingzeit auf einen konstanten Wert einstellt. Was die Amplitude betrifft, besteht insoweit Übereinstimmung mit dem auf einen Signalsprung reagierenden normalen  $PT_1$ -Regler gemäß Fig. 3b. Wie dieser kann auch der proportionale Bandpaßregler einer periodischen Führungsgröße  $w$  nicht vollständig ohne Regeldifferenz folgen, und er vermag auch eine periodische Störgröße  $z$  nicht vollständig auszuregulieren.

Wie man der Fig. 7 entnehmen kann, liegen die Polstellen des proportionalen Bandpaßreglers links der imaginären Achse im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen  $s$ . Auch hier ist der Betrag der Polstellen (also ihr Abstand vom Nullpunkt) so zu wählen, daß er gleich der Periodenfrequenz der Führungs- bzw. Störgröße ist.

Eine praktische Realisierung für einen integralen Bandpaßregler ist in Fig. 8 gezeigt. Die komplexe Übertragungsfunktion dieses integralen Bandpaßreglers lautet:

$$G_{IBP}(s) = \frac{3 \cdot s \cdot R \cdot C}{1 + (s \cdot R \cdot C)^2} \quad (17)$$

Der integrale Bandpaßregler hat — wie man aus dem Nenner von (17) erkennt — zwei Polstellen auf der imaginären Achse der komplexen  $s$ -Ebene, die bei

$$s = \pm j \frac{1}{RC}$$

liegen. In diesem Fall ist der Betrag der Polstellen gleich deren Imaginärteil. Für die technisch-physikalische Kreisfrequenz  $j\omega$  ist an der Stelle

$$j\omega = j \frac{1}{RC} \quad (18)$$

die komplexe Übertragungsfunktion.

$$G_{IBP} \rightarrow \infty$$

Der Betrag der Pole des Polstellenpaares ist

$$|s| = \omega = 2\pi f = \frac{1}{RC} \quad (19)$$

In diesem Fall müssen also  $R$  und  $C$  so bemessen werden, daß  $f$  gleich der Periodenfrequenz der Führungs- bzw. Störgröße ist.

Weiteres darüber findet man in dem Buch von U. Tietze und CH. Schenk "Halbleitertechnik", Seite 433.

Eine praktische Realisierung für einen proportionalen Bandpaßregler ist in Fig. 9 gezeigt. Seine komplexe Übertragungsfunktion lautet:

$$G_{PBP}(s) = \frac{5/2 \cdot s \cdot R \cdot C}{1 + 1/2 \cdot s \cdot R \cdot C + (s \cdot R \cdot C)^2} \quad (20)$$

Der proportionale Bandpaßregler hat — wie man aus dem Nenner von (20) erkennt — ein konjugiert komplexes Polstellenpaar, das links der imaginären Achse im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen  $s$  liegt. Die beiden Pole des Polstellenpaares liegen bei

$$s = 1/4 RC [-1 \pm j\sqrt{3}] \quad (21)$$

Der Betrag der Pole des Polstellenpaares ist

$$|s| = \omega = 2\pi f = \frac{1}{4RC} \sqrt{1^2 + \sqrt{15^2}} = \frac{1}{RC} \quad (22)$$

Für die technisch-physikalische Kreisfrequenz  $j\omega$  ist an der Stelle

$$j\omega = j \frac{1}{RC} \quad (23)$$

die komplexe Übertragungsfunktion

$$G_{BPB} = 5$$

Auch in diesem Fall müssen also R und C so bemessen werden, daß f gleich der Periodenfrequenz der Führungs- bzw. Störgröße ist.

Anstelle einer Realisierung des Bandpaßreglers bzw. des Rückführungsgliedes mit Bandpaßverhalten durch analoge Filterschaltungen, können auch digitale Filterschaltungen mit Mikroprozessoren eingesetzt werden, wie dies beispielsweise FIR-Filter und IIR-Filter sind (siehe Buch von U. Tietze und CH. Schenk "Halbleiterschaltungstechnik" Seiten 807ff und Seite 833ff).

Durch Einsatz eines integralen Bandpaßreglers ist es auch möglich, sowohl eine periodische Führungsgröße w ohne Regelabweichung einzuregeln als auch eine periodische Störgröße z vollständig auszuregeln. Wenn die Periodenfrequenzen unterschiedlich sind, muß der integrale Bandpaßregler eine Polstelle bei jeder der beiden Periodenfrequenzen und ggf. weitere Polstellen bei den Harmonischen davon haben. Wenn die beiden Periodenfrequenzen gleich sind, fallen die beiden Polstellen zusammen.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß das gleichzeitige Einregeln einer periodischen Führungsgröße w und das Ausregeln einer periodischen Störgröße z durch Verwendung eines Rückführungsgliedes, das Bandpaßverhalten hat, nicht möglich ist. Mit dem Rückführungsglied kann nur eine periodische Störgröße z ausgeregelt, nicht aber eine Führungsgröße w eingeregelt werden. Ist dagegen in der Führungsgröße ein unerwünschter Anteil dieser Frequenz, so wird dieser unterdrückt.

Einen praktischen Fall für die Anwendung einer Regelungs-Anordnung der vorstehend beschriebenen Art zeigt die in Fig. 8 schematisch dargestellte Schabrad-Schleifmaschine. Auf einer Schlittenführung 6 ist ein Schlitten 7 linear verschiebbar angeordnet. Die Linearverschiebung des Schlittens 7 erfolgt durch einen Antrieb 9 über eine Gewindespindel 8, derart, daß der Schlitten 7 eine Hin- und Herbewegung ausführt, wie dies durch den Doppelpfeil 10 angedeutet ist. An dem Schlitten 7 ist das zu schleifende Schabrad 11 drehbar um eine Achse 22 gehalten. Von dem Schabrad 11 sind der Einfachheit halber nur zwei Zähne 12 gezeigt. Das Schabrad kann mittels eines Antriebs 14 über einen Schneckentrieb 15 hin- und hergedreht werden, wie dies durch den Doppelpfeil 13 angedeutet ist. In die Lücke zwischen zwei Zähnen 12 des Schabrades 11 greift eine Schleifscheibe 19 ein, die um eine schräg gestellte Achse 20 rotiert, wie dies durch den Pfeil 21 angedeutet ist.

Die periodische Linearbewegung des Schabrades 6 gem. Doppelpfeil 10 wird durch einen Sensor 16 gemessen, der diese Linearbewegung als Führungsgröße w ausgibt. Mit der Achse 22 des Schabrades 11 ist ein Winkelgeber 17 gekoppelt, der die Drehbewegung des Schabrades 11 als Ist-Wert x ausgibt. Die Regeldifferenz e wird einem Regler 1 mit Bandpaßanteil zugeführt. Dieser erzeugt den Stellwert u für den Antrieb 14. Auf diese Weise wird die hin- und hergehende Drehbewegung des Schabrades 11 durch die hin- und hergehende Linearbewegung des Schlittens 7 geführt. Bei jeder Hin- und Herbewegung des Schabrades 11 erfolgt ein Schleifkontakt mit Schleifscheibe 19. Dieser Schleifkontakt wirkt sich störend auf das Drehmoment des Antriebs 14 aus, mit dem das Schabrad 11 als Folge der Linearbewegung des Schlittens 7 hin- und hergedreht werden muß. Die Störung kann zu Fehlern beim Schleifen des Schabrades 11 führen.

Im vorliegenden Fall haben die Hin- und Herbewegung des Schlittens 7, die Hin- und Herbewegung des Schabrades 11 und die Störkontakte zwischen Schabrad 11 und Schleifscheibe 19 die gleiche Grundfrequenz. Wie oben beschrieben, ist es durch die Verwendung des Reglers 1 mit Bandpaßanteil der konjugiert komplexe Polstellen bei der Grundfrequenz und allen vorkommenden Harmonischen haben muß, nicht nur möglich, eine Führung des Antriebes 14 durch den Antrieb 9 ohne Regeldifferenz zu gewährleisten, sondern außerdem auch die durch die Schleifkontakte zwischen Schabrad 11 und Schleifscheibe 19 auftretenden Störungen vollständig auszuregeln.

Der vorstehend erwähnte Regler 1 mit Bandpaßanteil, der konjugiert komplexe Polstellen bei der Grundfrequenz und allen vorkommenden Harmonischen haben muß, soll nachfolgend als Kammfilter-Regler bezeichnet werden. Der Bandpaßregler mit nur einem Polstellenpaar ist als Spezialfall des Kammfilter-Reglers zu betrachten. Unter diesem Aspekt gelten die vorstehend für den Bandpaßregler angestellten Überlegungen gleichermaßen auch für den Kammfilter-Regler.

Fig. 11 stellt eine Alternative zu Fig. 2 dar. In Fig. 11 ist der Regler 1 aus einem Kammfilter-Regler 34 und einem Restregler 35 gebildet, die in Serie geschaltet sind. Die Übertragungsfunktion des zusammengesetzten Reglers 1 ergibt sich hier wie folgt

$$G_R(s) = G_{KF}(s) \cdot G_{RR}(s) \quad (24)$$

Setzt man anstelle von  $G_R$  in die Gleichungen (6) und (14)  $G_{KF} \cdot G_{RR}$ , so werden die Grenzwertüberlegungen gemäß den Gleichungen (7) und (15) dadurch nicht beeinträchtigt, wenn nunmehr statt  $G_R \rightarrow \infty$  gesetzt wird

$G_{KF} \rightarrow \infty$ . Das bedeutet Mit anderen Worten, daß der Restregler auch hier für die betrachtete Funktion des Kammfilter-Reglers ohne Einfluß ist. Für den Kammfilter-Regler gelten selbstverständlich auch die im Zusammenhang mit Fig. 2 angestellten Überlegungen und umgekehrt.

Gemäß Fig. 12 ist das Kernstück des Kammfilter-Reglers 34 eine Mitkopplungsschaltung 36, die einen Addierer 37 enthält. Dem Addierer 37 werden die Regeldifferenz  $e$  und ein Mitkopplungssignal zur Addition zugeführt. Das Mitkopplungssignal wird dem Addierer 37 über einen Mitkopplungszweig zugeführt, der mit dem Ausgang des Addierers 37 verbunden ist. Der Mitkopplungszweig enthält ein Totzeitglied 39 mit einer Verzögerungszeit  $T_v$  und einen frequenzunabhängigen Verstärker 38 mit dem Verstärkungsfaktor  $K_1$ . Der Mitkopplungsschaltung 36 ist ein weiterer frequenzunabhängiger Verstärker 40 mit dem Verstärkungsfaktor  $K_2$  nachgeschaltet. Das Ausgangssignal des weiteren Verstärkers 40 sowie die Regeldifferenz  $e$  werden in einem weiteren Addierer 41 addiert. Aus der Summe dieser beiden Signale ergibt sich dann die Ausgangsgröße  $a$  des Kammfilter-Reglers 34.

Die Übertragungsfunktion des in Fig. 12 gezeigten Kammfilter-Reglers lautet:

$$G_{KF}(s) = \frac{K_2 + 1 - K_1 \cdot e^{-sT_v}}{1 - K_1 \cdot e^{-sT_v}} \quad (25)$$

Für den zugehörigen Frequenzgang ergibt sich:

$$G_{KF}(j\omega) = \frac{K_2 + 1 - K_1 \cdot e^{-j\omega T_v}}{1 - K_1 \cdot e^{-j\omega T_v}} \quad (26)$$

Mit

$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{T_v}$$

folgt:

$$G_{KF}\left(jn \frac{2\pi}{T_v}\right) = \frac{K_2 + 1 - K_1}{1 - K_1} = K_{\max} \quad (27)$$

mit  $n = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \dots$

In Fig. 13 ist der Betrag des Frequenzganges in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz für den Fall  $0 < K_1 < 1$  gezeigt. Bei der Kreisfrequenz Null, bei der Grundkreisfrequenz und bei allen Vielfachen der Grundkreisfrequenz (Höherharmonische) ergibt sich die Verstärkung  $K_{\max}$ , welche über den Verstärkungsfaktor  $K_1$  zwischen dem Wert Null und Unendlich einstellbar ist.

In Fig. 14 ist die Verteilung der Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen  $s$  gezeigt. Alle Polstellen liegen links der imaginären Achse.

Die Fig. 13 und 14 kennzeichnen demnach einen proportionalen Kammfilter-Regler.

Mit  $K_1 = 1$  folgt  $K_{\max} = \infty$ , und es ergibt sich der von der Kreisfrequenz abhängige Betrag des Frequenzganges in Fig. 15.

Die dem in Fig. 15 gezeigten Betrag des Frequenzganges entsprechende Verteilung der Polstellen im Koordinatensystem der komplexen Veränderlichen  $s$  ist in Fig. 16 dargestellt. Man erkennt, daß alle Pole auf der imaginären Achse liegen. Dementsprechend kennzeichnen die Fig. 15 und 16 einen integrierenden Kammfilter-Regler.

Über  $K_2$  wird die Bandbreite des Kammfilter-Reglers und somit der Einfluß auf die übrigen Frequenzbereiche abgestimmt. In Fig. 17 ist der Betrag des Frequenzganges eines integrierenden Kammfilter-Reglers mit  $K_1 = 1$  und mit kleinerem  $K_2$  als bei dem Kammfilter-Regler gemäß Fig. 15 dargestellt.

Der erfindungsgemäße Kammfilter-Regler kann sowohl in Analog- als auch in Digitaltechnik realisiert werden.

Eine analoge Ausführungsform des Kammfilter-Reglers ist in Fig. 18 prinzipiell dargestellt. Entsprechende Schaltungsteile sind mit den gleichen Bezugsziffern versehen worden, wie in Fig. 12. Die Multiplikation mit den Faktoren  $K_1$  und  $K_2$  wird durch die Analogverstärker 38 und 40 realisiert. Mit 37 und 41 sind Addierer bezeichnet. Das analoge Totzeitglied 39 ist durch eine drehbar gelagerte magnetisierbare Scheibe 56 sowie einen mit ihrem Rand korrespondierenden Schreibkopf 57 und einem Lesekopf 58 realisiert. Die Scheibe wird mit einer Drehfrequenz gedreht, die mit der Grundfrequenz der periodischen Stör- bzw. Führungsgröße übereinstimmt. Dazu kann sie beispielsweise mit dem später noch im Zusammenhang mit Fig. 19 erläuterten Werkstück 42 gekoppelt sein. Wird der Abstand zwischen dem Schreibkopf 57 und dem Lesekopf 58 sehr gering gewählt, so wird nach annähernd einer Umdrehung der Scheibe 56 das vom Schreibkopf 57 aufgezeichnete Signal von dem Lesekopf 58 mit entsprechender Verzögerung bzw. Totzeit ausgelesen.

Ein weiterer praktischer Fall für die Anwendung des erfindungsgemäßen Bandpaßreglers bzw. Kammfilter-Reglers zeigt die in Fig. 19 prinzipiell dargestellte Anordnung zur Bearbeitung von Zahnrädern. Hierbei wird ein zahnrad- bzw. schneckenförmiges Werkzeug 45 kontinuierlich mit einem zahnradförmigen Werkstück 42 abge-



wälzt. Das Werkstück 42 wird über einen Führungsantrieb 43 drehzahl geregelt, so daß sich die mit dem Pfeil 44 angedeutete Drehrichtung ergibt. Das Werkzeug 45 wird von dem Folgeantrieb 46 angetrieben, wodurch sich die mit dem Pfeil 47 angedeutete Drehrichtung ergibt. Mit dem Werkstück 42 ist ein Winkelgeber 48 gekoppelt. Mit dem Werkzeug 45 ist ein Drehzahlgeber 48 und ein Winkelgeber 50 gekoppelt. Die von den beiden Winkelgebern 49, 50 erzeugten Ausgangssignale werden einem Differenzbildner 51 zugeführt. Die so erzeugte Regeldifferenz wird einem Winkelregler 52 zugeführt, der den Drehzahlsollwert für den Folgeantrieb 46 erzeugt. Der Drehzahlsollwert  $w$  und die von dem Drehzahlgeber 48 erzeugte Drehzahl-Regelgröße  $x$  werden einem weiteren Differenzbildner 53 zugeführt, welcher die Regeldifferenz  $e$  erzeugt und einem Kammfilter-Regler 54 zuführt. Die Ausgangsgröße des Kammfilter-Reglers 54 wird einem Restregler 55 zugeführt, der die Stellgröße  $u$  erzeugt und dem Folgeantrieb 46 zuführt.

Da das Werkzeug 45 gegenüber dem Werkstück 42 sehr geringe Verzahnungs-Abweichungen aufweist, werden die auftretenden Drehzahl- und Winkelschwankungen maßgeblich durch die Verzahnungsabweichungen des Werkstückes beeinflußt.

Wird der Kammfilter-Regler 54 mit einer Totzeit realisiert, welche dem Kehrwert der Drehfrequenz des Werkstückes 42 entspricht, so kann die durch das Werkstück 42 hervorgerufene periodische Regeldifferenz eliminiert werden.

#### Patentansprüche

1. Regelungs-Anordnung, insbesondere zur Regelung des Antriebs für ein bewegtes Werkstück oder bewegtes Werkzeug an einer Werkzeugmaschine, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Regler (1) zum Einregeln einer periodischen Führungsgröße ( $w$ ) mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Führungsgröße ( $w$ ) ist, und/oder daß der Regler (1) zum Ausregeln einer periodischen Störgröße ( $z$ ) mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ( $z$ ) ist.
2. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß zum Ausregeln einer periodischen Störgröße ( $z$ ) als zusätzliche oder alternative Maßnahme im Rückführzweig für die Regelgröße ( $x$ ) ein Rückführglied (3) vorgesehen ist, welches mindestens ein konjugiert komplexes Polstellenpaar aufweist, wobei der Betrag jeder der beiden Polstellen im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der Störgröße ( $z$ ) ist.
3. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Regler (1) bei nicht-sinusförmiger Führungsgröße ( $w$ ) weitere konjugiert komplexe Polstellenpaare aufweist, wobei der Betrag jeder Polstelle eines Polstellenpaares im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der entsprechenden Harmonischen der Führungsgröße ( $w$ ) ist.
4. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Regler (1) und/oder das Rückführglied (3) bei nicht-sinusförmiger Störgröße ( $z$ ) weitere konjugiert komplexe Polstellenpaare aufweist, wobei der Betrag jeder Polstelle eines Polstellenpaares im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) gleich oder annähernd gleich der Periodenfrequenz der entsprechenden Harmonischen der Störgröße ( $z$ ) ist.
5. Regelungs-Anordnung nach einem der vorherstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die komplexe Übertragungsfunktion des Reglers (1) und/oder des Rückführgliedes (3) zur Erzeugung eines integralen Bandpaß- bzw. Kammfilter-Verhaltens ein Polstellenpaar bzw. mehrere Polstellenpaare nur auf der imaginären Achse ( $jw$ ) im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) hat.
6. Regelungs-Anordnung nach einem der Ansprüche 1—4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die komplexe Übertragungsfunktion des Reglers (1) und/oder des Rückführgliedes (3) zur Erzeugung eines proportionalen Bandpaß- bzw. Kammfilter-Verhaltens ein Polstellenpaar bzw. mehrere Polstellenpaare nur links der imaginären Achse ( $jw$ ) im Koordinatensystem ( $\delta, jw$ ) der komplexen Veränderlichen ( $s$ ) hat.
7. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 3 und Anspruch 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Regler (34) zur Realisierung eines Kammfilter-Verhaltens aus einer Mitkopplungs-Schaltung (36) mit einem im Mitkopplungsweig befindlichen Totzeitglied (39) besteht oder eine solche Mitkopplungs-Schaltung enthält, und daß die Verzögerungszeit ( $T_v$ ) des Totzeitgliedes (39) gleich oder annähernd gleich dem Kehrwert der Periodenfrequenz der Führungsgröße ( $w$ ) ist.
8. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 4 und 5 oder 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Regler (34) und/oder das Rückführglied zur Realisierung eines Kammfilter-Verhaltens aus einer Mitkopplungs-Schaltung (36) mit einem im Mitkopplungsweig befindlichen Totzeitglied (39) bestehen/besteht oder eine solche Mitkopplungs-Schaltung enthalten/enthält, und daß die Verzögerungszeit ( $T_v$ ) des Totzeitgliedes (39) gleich oder annähernd gleich dem Kehrwert der Periodenfrequenz der Störgröße ( $z$ ) ist.
9. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Mitkopplungs-Schaltung (36) einen Addierer (37) aufweist, dem das Eingangssignal ( $e$ ) für die Mitkopplungs-Schaltung (36) zugeführt ist und der außerdem mit dem Ausgang des Mitkopplungsweiges verbunden ist, und daß der Ausgang des Addierers (37) mit dem Eingang des Mitkopplungsweiges verbunden ist.
10. Regelungs-Anordnung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß im Mitkopplungsweig mit dem Totzeitglied (39) ein Verstärkungsglied (38) in Serie geschaltet ist.
11. Regelungs-Anordnung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Mitkopplungs-Schaltung mit einem weiteren Verstärkungsglied (40) in Serie geschaltet ist, und daß der vorstehend

erwähnten Serienschaltung aus Mitkopplungs-Schaltung und dem weiteren Verstärkungsglied (40) ein weiterer Addierer (41) nachgeschaltet ist, dem neben dem Ausgangssignal der vorstehend erwähnten Serienschaltung das Eingangssignal (e) für die Mitkopplungs-Schaltung zugeführt ist.

5 12. Regelungs-Anordnung nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Totzeitglied (39) von einer um ihre Achse drehbaren Kreisscheibe (56) aus magnetisierbarem Material sowie einem mit dem Scheibenrand korrespondierenden Schreibkopf (57) und einem ebenfalls mit dem Scheibenrand korrespondierenden und in Drehrichtung der Scheibe (56) hinter dem Schreibkopf (57) angeordneten Lesekopf (58) gebildet ist.

10 13. Verwendung einer Regelungs-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 12 zum Antrieb eines Werkzahnrades bzw. eines Werkzeuges bei einer in kontinuierlichem oder diskontinuierlichem Abwälzverfahren arbeitenden Zahnradbearbeitungsmaschine oder des zu schleifenden Schabrades bei einer diskontinuierlich arbeitenden Schabradschleifmaschine.

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

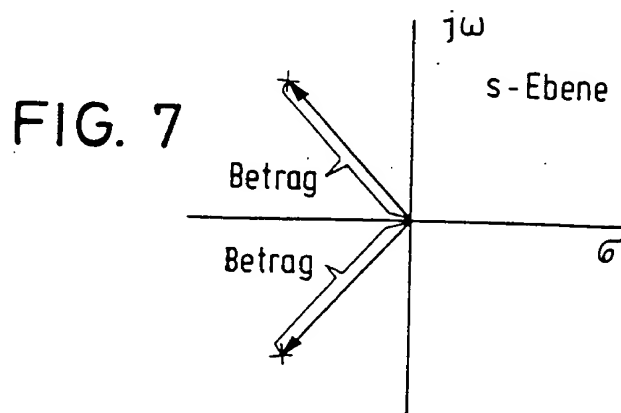
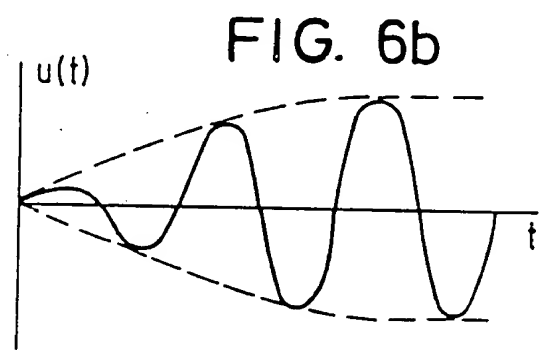
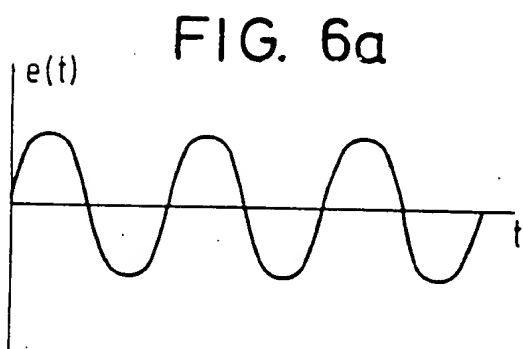
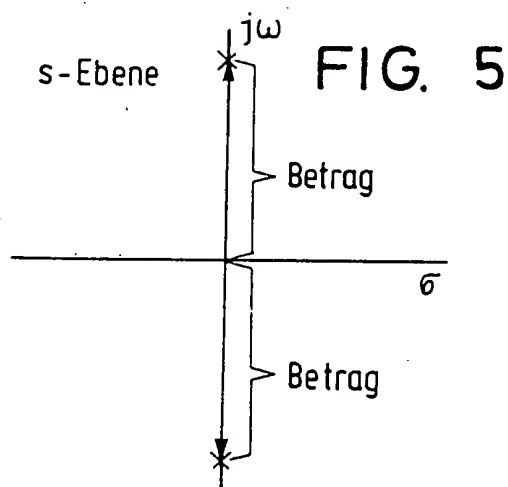
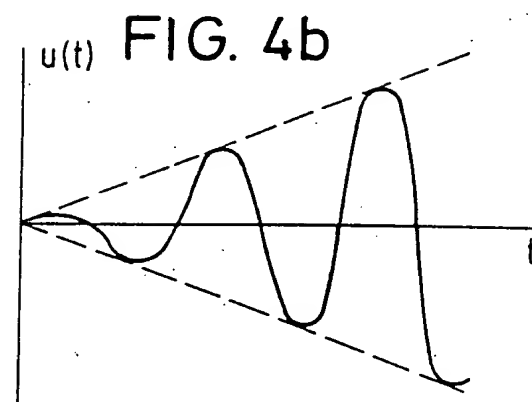
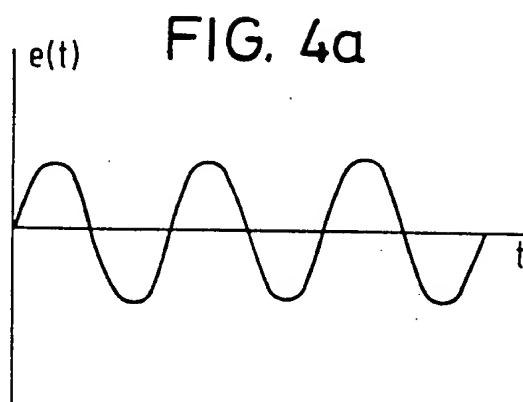


FIG. 8

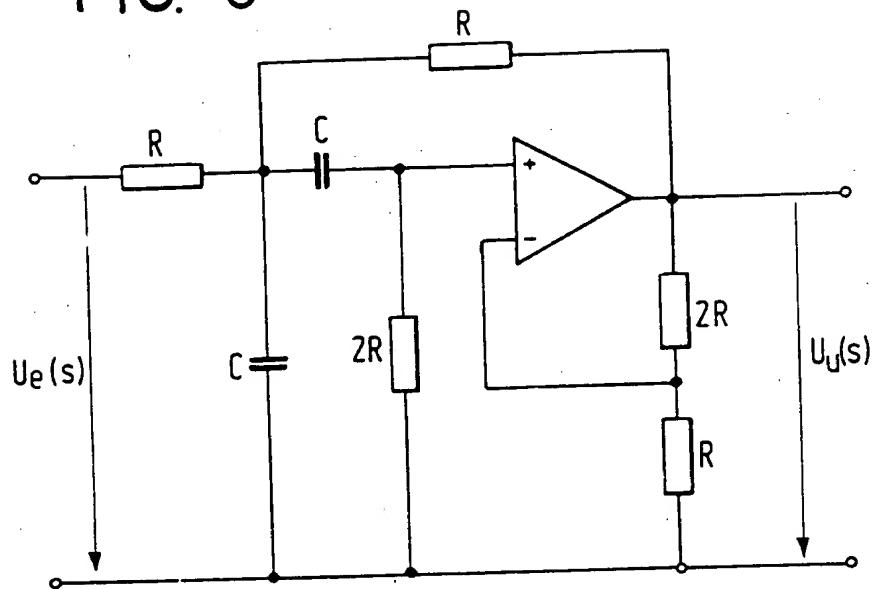


FIG. 9

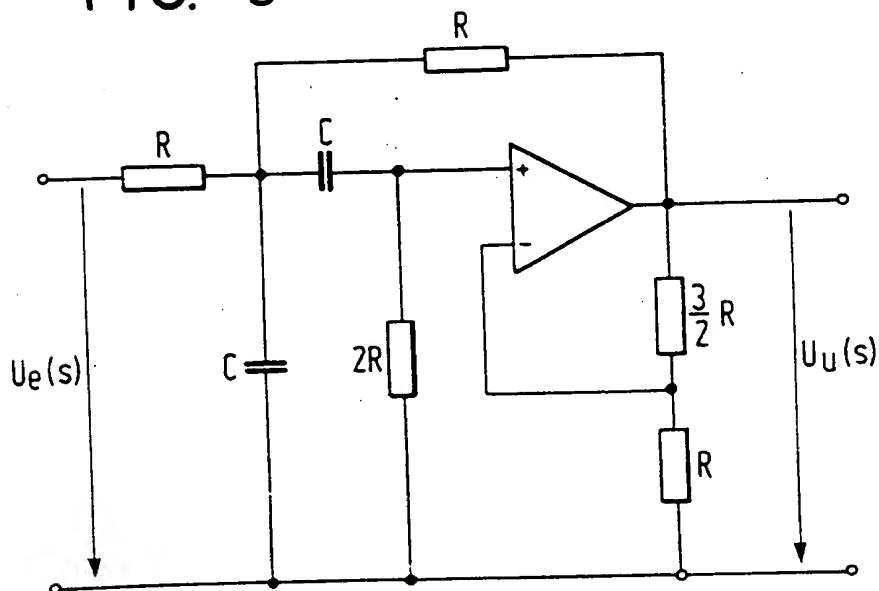




FIG. 11

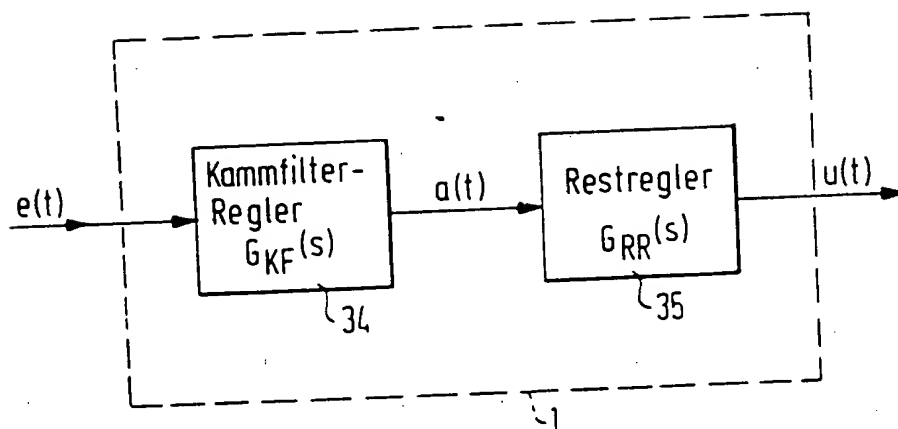


FIG. 12

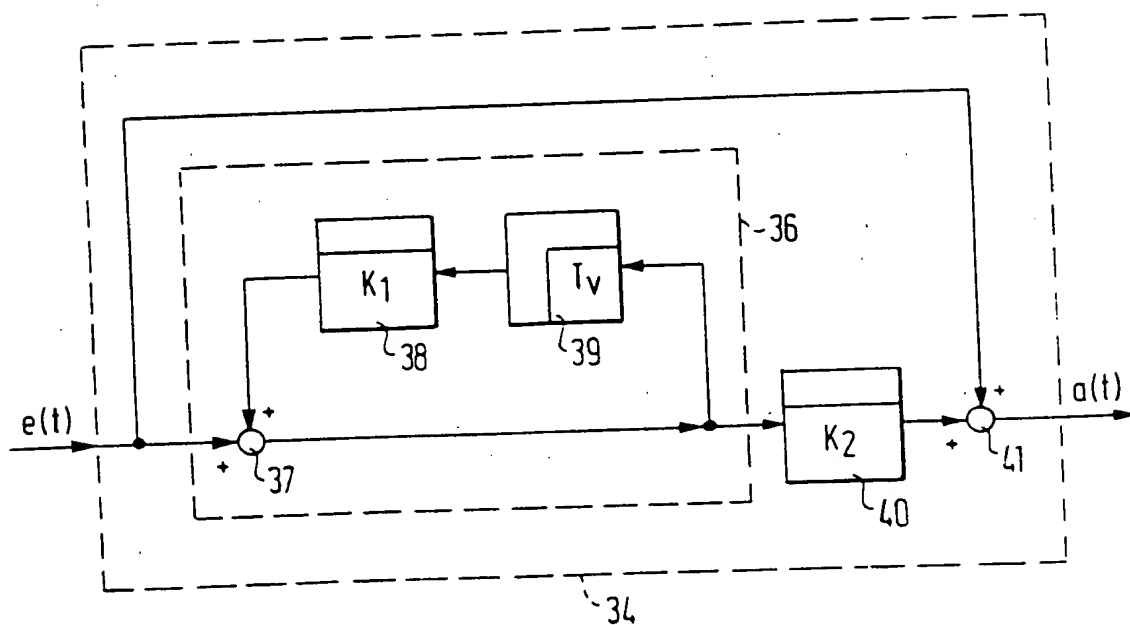


FIG. 13

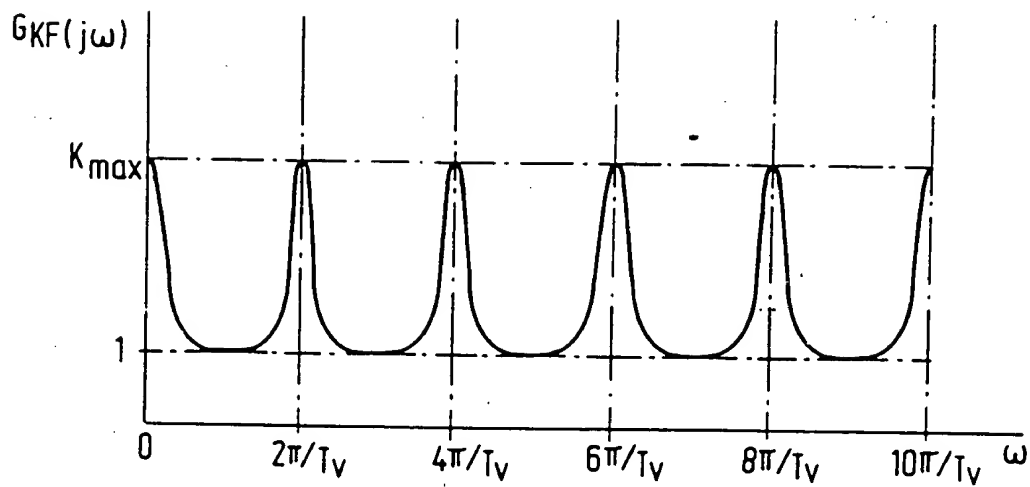


FIG. 14

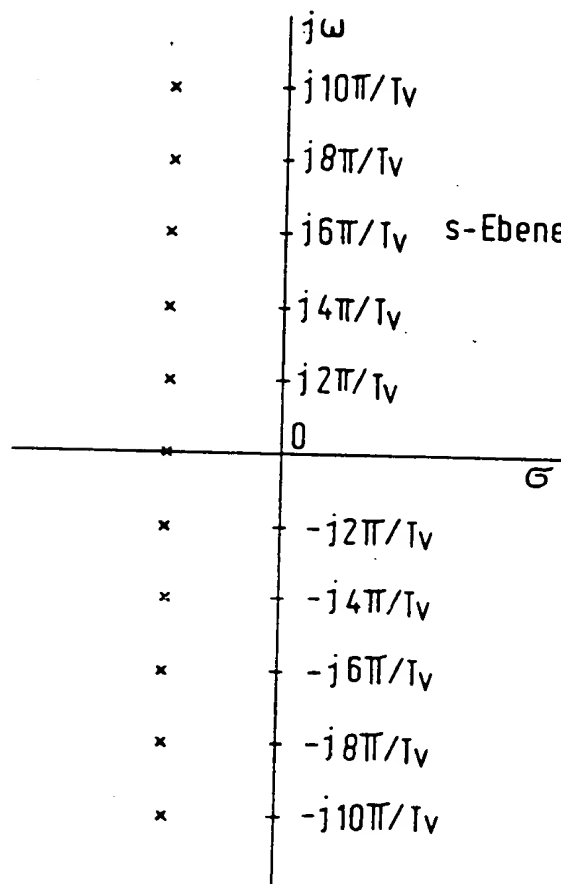




FIG. 15

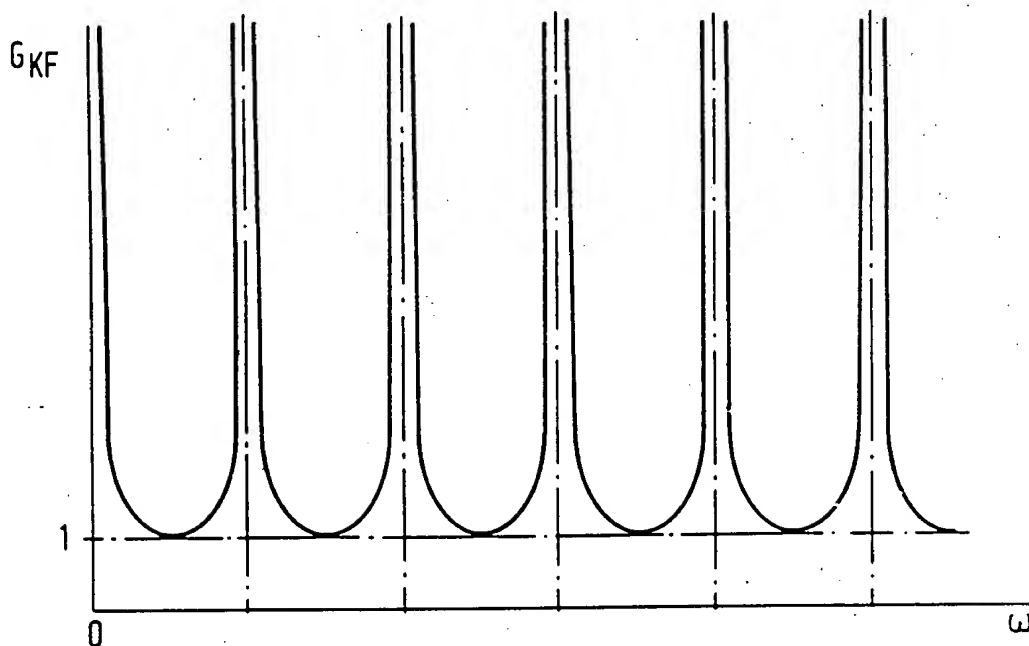


FIG. 16

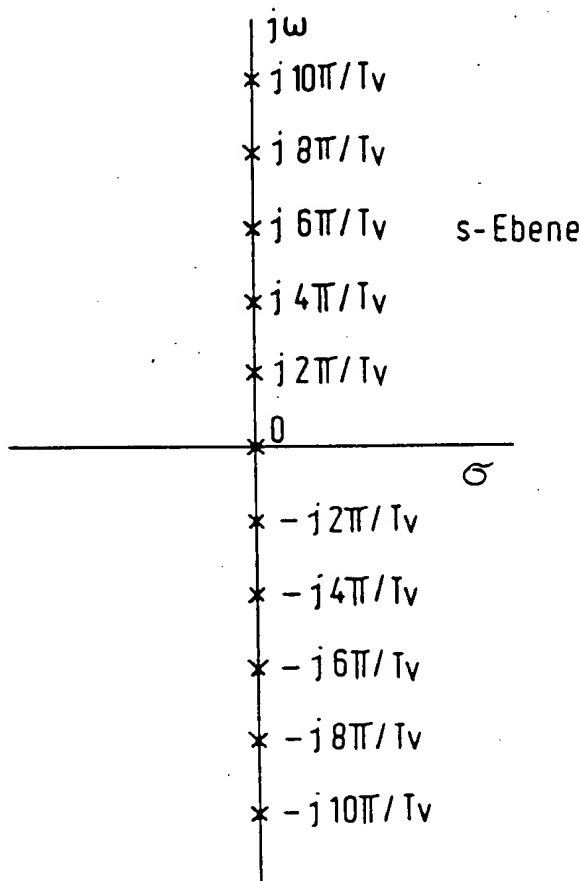


FIG. 17

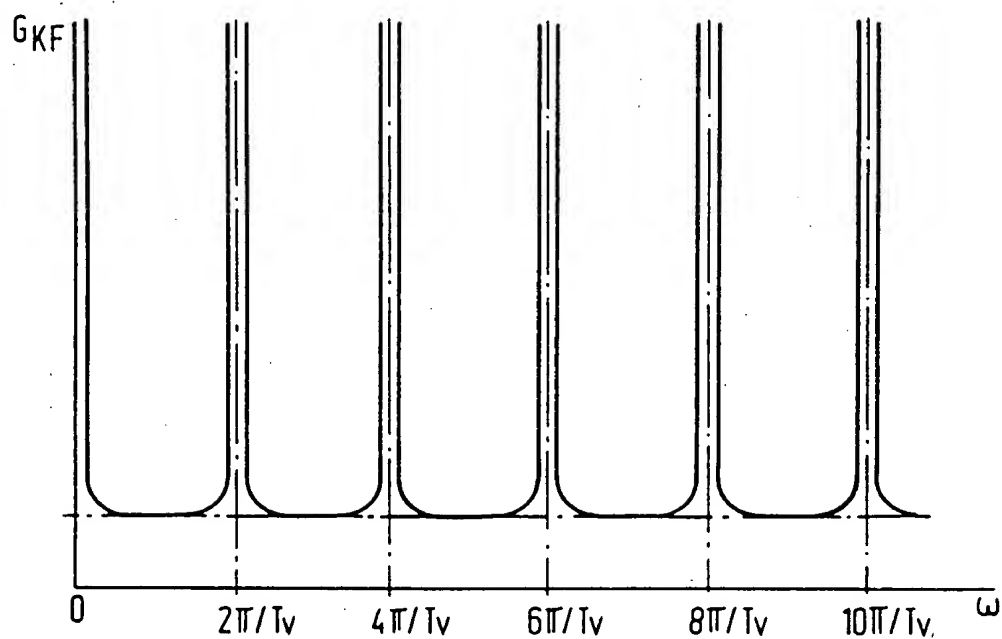


FIG. 18

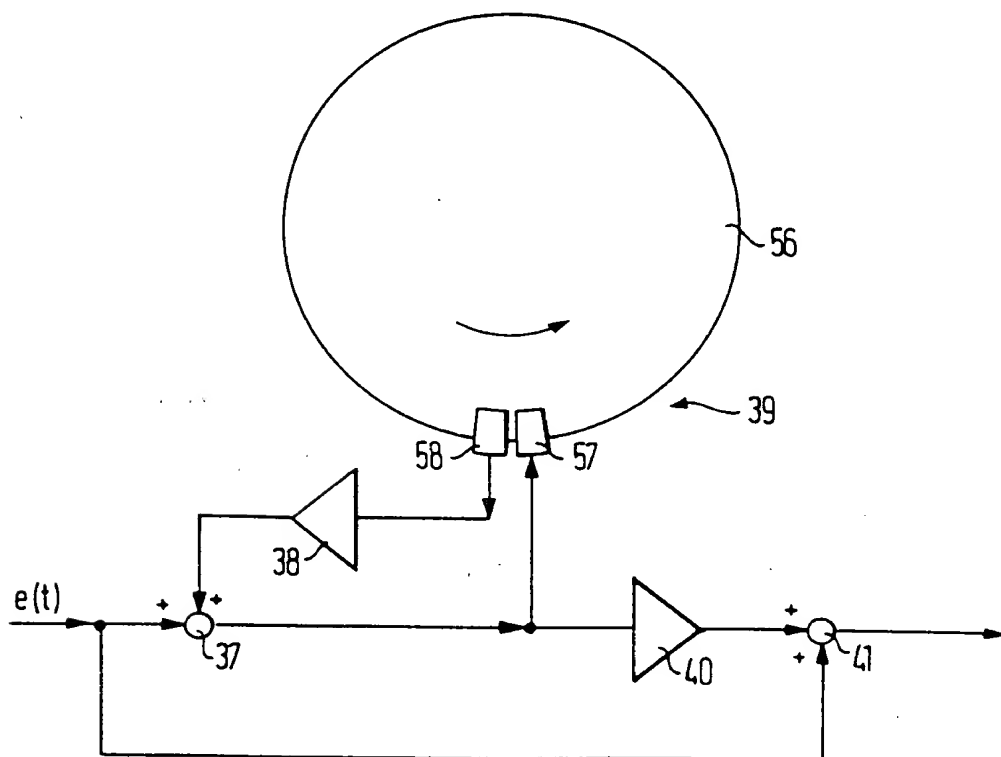


FIG. 19

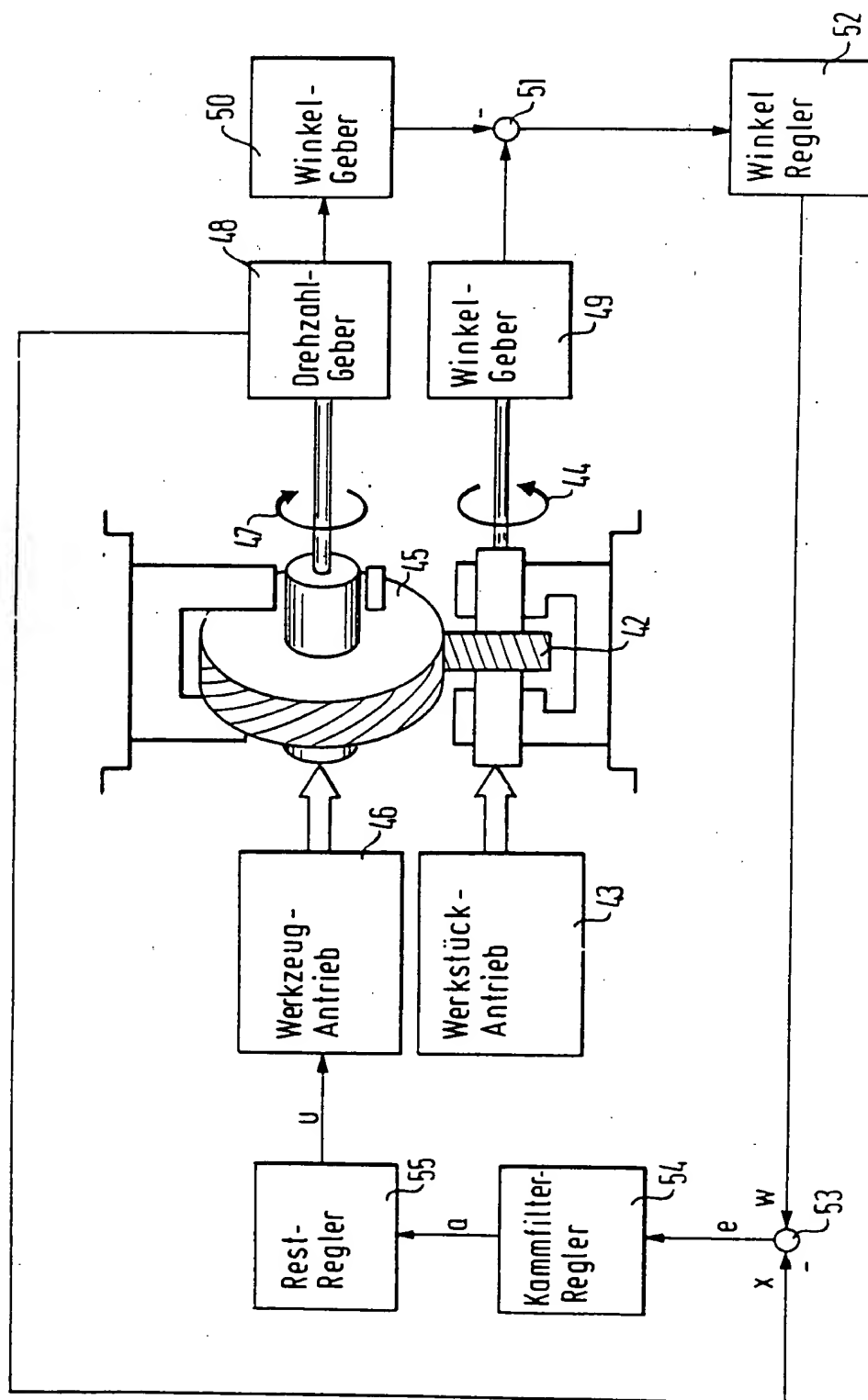


FIG. 1

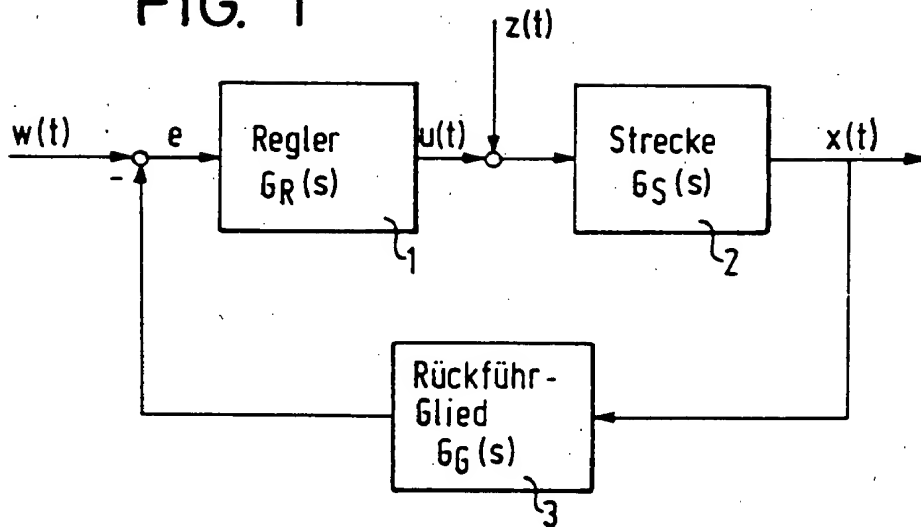


FIG. 2

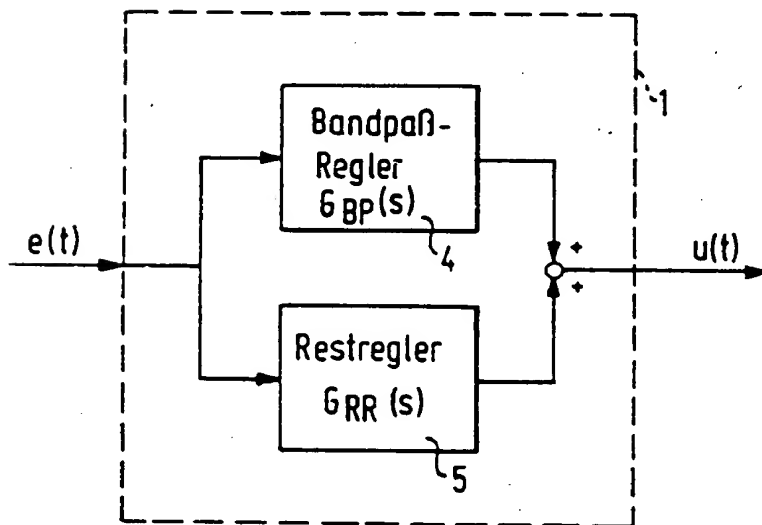


FIG. 3a

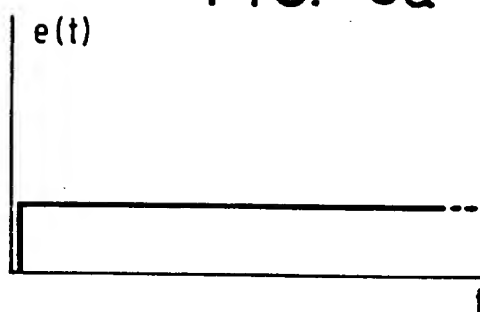


FIG. 3b

